

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Kurelja Luka**

Zagreb, 2015

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Tema

Regulacija Temperature na maketi

Mentor:

Prof. dr. sc. Mladen Crneković

Student:

Kurelja Luka

Zagreb, 2015



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **LUKA KURELJA**

Mat. br.: 0035177457

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku: **REGULACIJA TEMPERATURE MAKETE**

Naslov rada na  
engleskom jeziku: **MOCK UP TEMPERATURE CONTROL**

Opis zadatka:

Regulacija temperature prikladan je proces pomoću kojeg se studentima tumače principi regulacije. Zadana je maketa toplinskog procesa s žaruljom kao izvorom topline i DS1821 integriranim senzorom kao mjernim uređajem temperature zraka. Maketom upravlja AT89C51ID2 kontroler koji naredbe prima preko serijske komunikacije.

Potrebno je projektirati grafičko sučelje i osmisliti redoslijed eksperimenata koji će studentima jasno prikazati nastavne jedinice iz regulacije procesa.

Tražena rješenja:

- opisati naredbe kontroleru procesa,
- dizajnirati grafičko sučelje za upravljanje i regulaciju temperature,
- prikazati snimanje statičkih i dinamičkih karakteristika procesa,
- zatvoriti povratnu vezu te prikazati utjecaj svakog člana PID regulatora.

Zadatak zadan:  
25. studenog 2014.

Rok predaje rada:  
**1. rok:** 26. veljače 2015.  
**2. rok:** 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 2., 3., i 4. ožujka 2015.  
**2. rok:** 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Mladen Crneković

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Zoran Kunica

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljuem se mentoru prof. dr. sc. Mladenu Crnekoviću na savjetima, smjernicama i potpori tijekom izrade rada.

Ovime bi se htio zahvaliti i svojoj obitelji na podršci i razumjevanju.

Luka Kurelja

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	II
POPIS OZNAKA .....	III
SAŽETAK.....	IV
SUMMARY .....	V
1. UVOD .....	1
2. SUSTAV .....	2
2.1. Maketa za mjerenje temperature .....	3
2.2. Mikrokontroler .....	3
2.3. Program u mikrokontroleru.....	4
2.4. Računalni Program (Aplikacija).....	5
2.4.1. Izrada aplikacije .....	7
3. OPIS RADA SUSTAVA.....	9
3.1. Proces upravljanja sustava .....	9
3.2. Proces regulacije sustava .....	10
4. KARAKTERISTIKE I IDENTIFIKACIJA SUSTAVA .....	11
4.1. Dinamička karakteristika .....	12
4.2. Statička karakteristika.....	13
4.3. Identifikacija sustava .....	14
5. REGULATORI.....	16
5.1. P regulator .....	17
5.2. I regulator.....	18
5.3. D regulator .....	19
5.4. PI regulator.....	20
6. ZAKLJUČAK.....	24
LITERATURA.....	25
PRILOZI .....	26

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Skica sustava .....	2
Slika 2.	Sustav .....	2
Slika 3.	Skica makete.....	3
Slika 4.	Mikrokontroler.....	4
Slika 5.	Kartica regulacije .....	5
Slika 6.	Kartica upravljanja.....	6
Slika 7.	Kartica statičke karakteristike .....	7
Slika 8.	Blok dijagram upravljanja sustava.....	9
Slika 9.	Blok dijagram regulacije sustava.....	10
Slika 10.	Dinamičke karakteristike sustava .....	12
Slika 11.	Statička karakteristika sustava.....	13
Slika 12.	Prijelazna karakteristika .....	14
Slika 13.	Blok dijagram paralelene forme PID regulatora .....	16
Slika 14.	Odziv P regulatora .....	17
Slika 15.	Odziv P regulatora .....	17
Slika 16.	Odziv dvaju I regulatora.....	18
Slika 17.	Odziv dvaju PI regulatora .....	20
Slika 18.	Odziv dvaju PI regulatora .....	21
Slika 19.	Odziv dvaju PI regulatora .....	22
Slika 20.	Odziv dvaju PI regulatora .....	23

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$e$	°C	Regulacijska pogreška
$T_u$	°C	Ulazna veličina regulacije zadanog sustava
$T_i$	°C	Izlazna veličina regulacije zadanog sustava
$K_P$		Proporcionalno pojačanje
$K_I$		Integralno pojačanje
$K_D$		Derivacijsko pojačanje
$T$	s	Vremenska konstanta
$\zeta$		Stupanj prigušenja
$t_1$	s	Vremenski interval da bi se postiglo novo stacionarno stanje
$t_2$	s	Vremenski interval trajanja mrtvog vremena
$A$		Amplituda ulazne odskočne funkcije
$P$		Proporcionalni član
$I$		Integralni član
$D$		Derivacijski član
PWM		Pulsno širinska modulacija

## SAŽETAK

U radu su prikazani upravljanje i regulacija sustava na primjeru regulacije temperature na maketi. Na ovom jednostavnom i relativnom sporom procesu pokazat će se snimanje statičkih i dinamičkih karakteristika sustava te odziva regulatora. Na temelju dinamičke karakteristike provest će se identifikacija sustava, a promatranjem odziva različitih regulatora pokazati će se njihovi prednosti i nedostatci.

Sustav se sastoji od triju glavnih komponenti: makete, mikrokontrolera i računalnog programa (aplikacije). Maketa i mikrokontroler dobiveni su kao cjeloviti sklopovi te je mikrokontroler dobiven programiran kao upravljačka jedinica. Računalni program (aplikacija) je jedina komponenta koja je razvijena od nule.

Ključne riječi: regulacija, upravljanje, mikrokontroler, Python, Qt, temperatura, regulacija temperature, regulator, PID, statička i dinamička karakteristika, serijska veza, RS232,



## SUMMARY

In this paper system regulation and control is presented on example of mock up temperature control. On this simple and relatively slow process static and dynamic characteristics will be recorded, also system response of various regulators will be shown. On the basis of systems dynamic characteristic system identification will be carried out, also by observing the response of the various regulators their advantages and disadvantages will be shown.

The system consists of three main components: mock up, microcontroller and computer program (application). Mock up and the microcontroller for the purposes of this paper were given as completed circuits, also microcontroller was programmed as control unit. A computer program is the only component that has been developed from scratch.

Key words: regulation, control, microcontroller, Python, Qt, temperature, temperature regulation, regulator, PID, static and dynamic characteristics, serial connection, RS232

## 1. UVOD

Regulacija temperature vjerojatno je najpoznatiji proces regulacije u današnjem svijetu. Primjer koji većina poznaje jest regulacija grijanja prostora. Nakon postavljanja željene temperature na termostatu, pali se grijanje. Kad temperatura u prostoriji dosegne zadanu vrijednost, termostat isključuje grijanje. Ovo je najjednostavniji primjer regulacije temperature. Danas u industriji postoji puno procesa i sustava kod kojih je potrebno regulirati temperaturu. Za većinu tih procesa potrebni su sofisticirani regulacijski sustavi. Po svojoj prirodi regulirani toplinski procesi su relativno spori te ovise o temperaturi okoline u kojoj se sustav nalazi. Položaji grijača i senzora topline unutar prostora regulacije definitivno utječu na parametre sustava.

Principi upravljanja i regulacije u ovom radu bit će demonstrirani na primjeru regulacije temperature na maketi. Bit će prikazani grafovi dinamičke i statičke karakteristike sustava. U zatvorenoj regulacijskoj petlji prikazat će se utjecaj svakog pojedinog člana PID regulatora, kao i kombinacije njegovih članova.

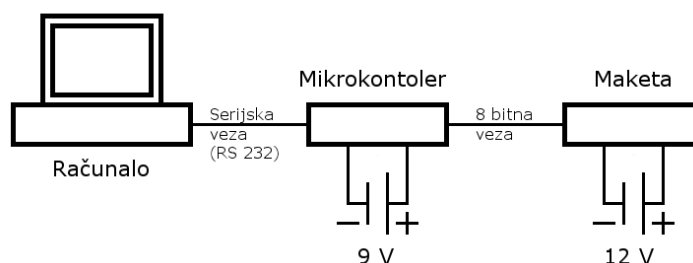
Za snimanje karakteristika i odziva regulacije napravljena je aplikacija u programskom jeziku Python. Aplikacija komunicira s maketom preko mikrokontrolera, koji služi kao njihov posrednik. Mikrokontroler prima podatke sa senzora topline te ih prosljeđuje računalu, a isto tako prima podatke od računala do makete. Komunikacija između računala i mikrokontrolera odvija se preko serijske veze RS232 standardom.

*Regulacije* je održavanje nekog stanja sustava ili njegova promjena po određenim zakonima, neovisno o djelovanju vanjskih ili unutarnjih poremećaja. To se postiže pomoću povratne veze, koja se definira kao uspoređivanje izlazne veličine s ulaznom te se na temelju njihove razlike djeluje na proces.

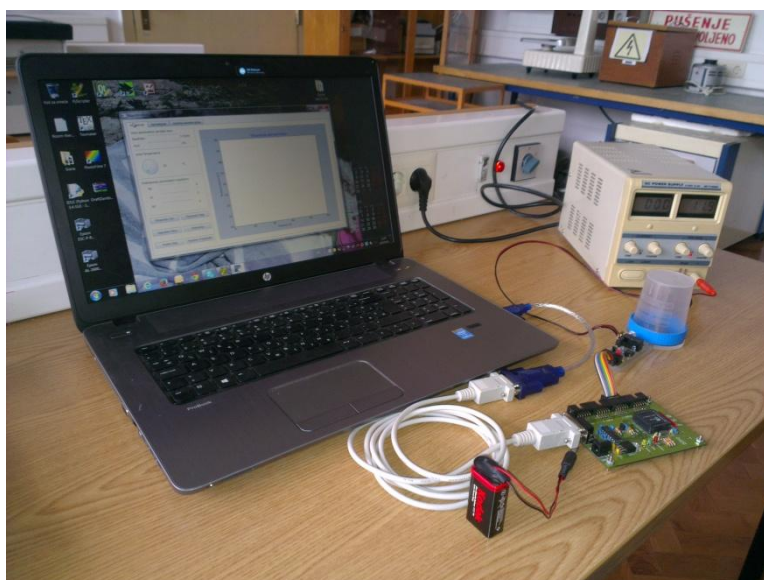
Uz pojam regulacije treba spomenuti i dva s njom usko povezana pojma: upravljanje i vođenje. *Upravljanje* je postupak koji se odvija u otvorenom krugu, bez povratne veze. Jedna ulazna veličina može utjecati na više izlaza i obrnuto. Pojam *vođenja* obuhvaća istovremeno i regulaciju i upravljanje pojedinim dijelovima kompleksnih sustava. Za složene sustave vođenje se obavlja pomoću računala (veliki sustavi mogu se podijeliti u manje podsustave, od kojih su neki regulirani dok su drugi upravljani).

## 2. SUSTAV

Sustav se sastoji od hardverskih komponenti, a to su računalo, mikrokontroler i maketa; te od softverskih: računalna aplikacija i program u mikrokontroleru. [Slika 1] prikazuje skicu sustava. Komunikacija između računala i mikrokontrolera, odvija preko serijske veze RS232 standarda. Veza između mikrokontrolera i makete je 8-bitna. Podatci između računala i mikrokontrolera te mikrokontrolera i makete primaju se i šalju u heksadecimalnom zapisu (što će detaljnije biti objašnjeno u 3. poglavlju).



Slika 1. Skica sustava

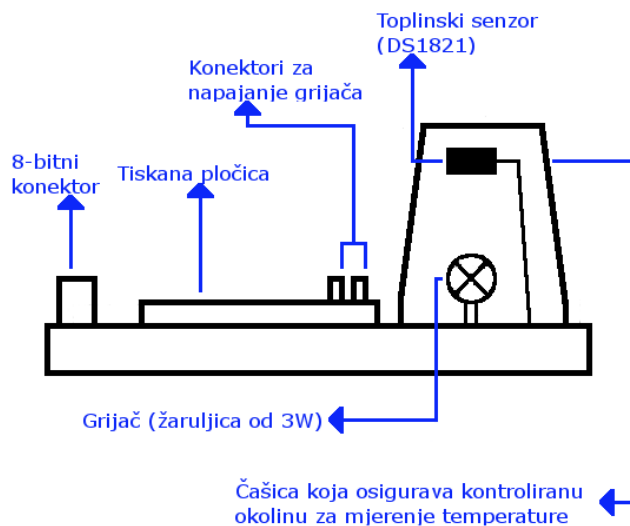


Slika 2. Sustav

## 2.1. Maketa za mjerenje temperature

Maketa sa [Slike 2] sastoji se od dva dijela. Prvi dio pokazuje tiskanu pločicu, na kojoj se nalazi pojačalo za ulazni signal, konektor za napajanje grijača i 8-bitni port. Pločica makete napaja se preko 8-bitnog porta iz istog izvora kao i mikrokontroler.

Drugi dio makete je čašica koja služi kao kontrolirana okolina za mjerenje temperature u kojoj se nalazi grijač (u ovom slučaju to je žaruljica snage 3 W) i toplinski senzor (DS1821). Grijač se napaja iz 12V-nog izvora.



Slika 3. Skica makete

## 2.2. Mikrokontroler

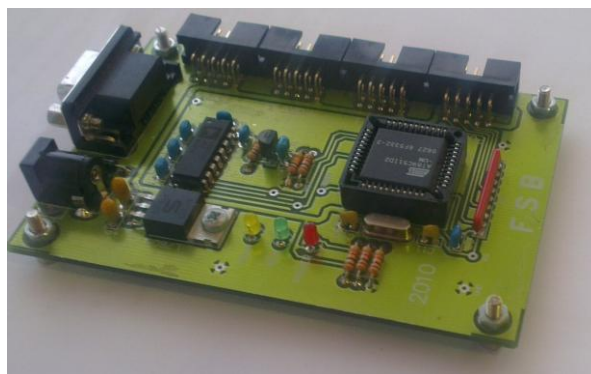
Korišten je Atmelov AT89C51D2 8-bitni mikrokontroler. Slika 3 prikazuje pločicu s mikrokontrolerom i popratnim komponentama. Ostale bitne komponente na pločici su: četiri 8-bitna porta, s numeričkim oznakama 0-3, serijski priključak DB-9, priključak za napajanje te tri LED lampice različitih boja, koji su indikatori za:

- a) Crvena – indicira da je pločica pod naponom
- b) Zelena - indicira primanje podataka

### c) Žuta - indicira slanje podataka

Za napajanje pločice mikrokontrolera koristi se 9V izvor, koji ujedno napaja i svu periferiju koja se spaja preko 8-bitnih portova.

Mikrokontroler dolazi sa sklopom pulsno širnsku modulaciju (PWM). PWM je modulacija koja se koristi kako bi se kodirane poruke prenijele pomoću digitalnog signala. Ova tehnika nalazi glavnu primjenu u kontroliranju količine napona na električnim uređajima, što je slučaj i u ovom radu, gdje se pomoću nje kontrolira koliko se napona pušta na grijač.



Slika 4. Mikrokontroler

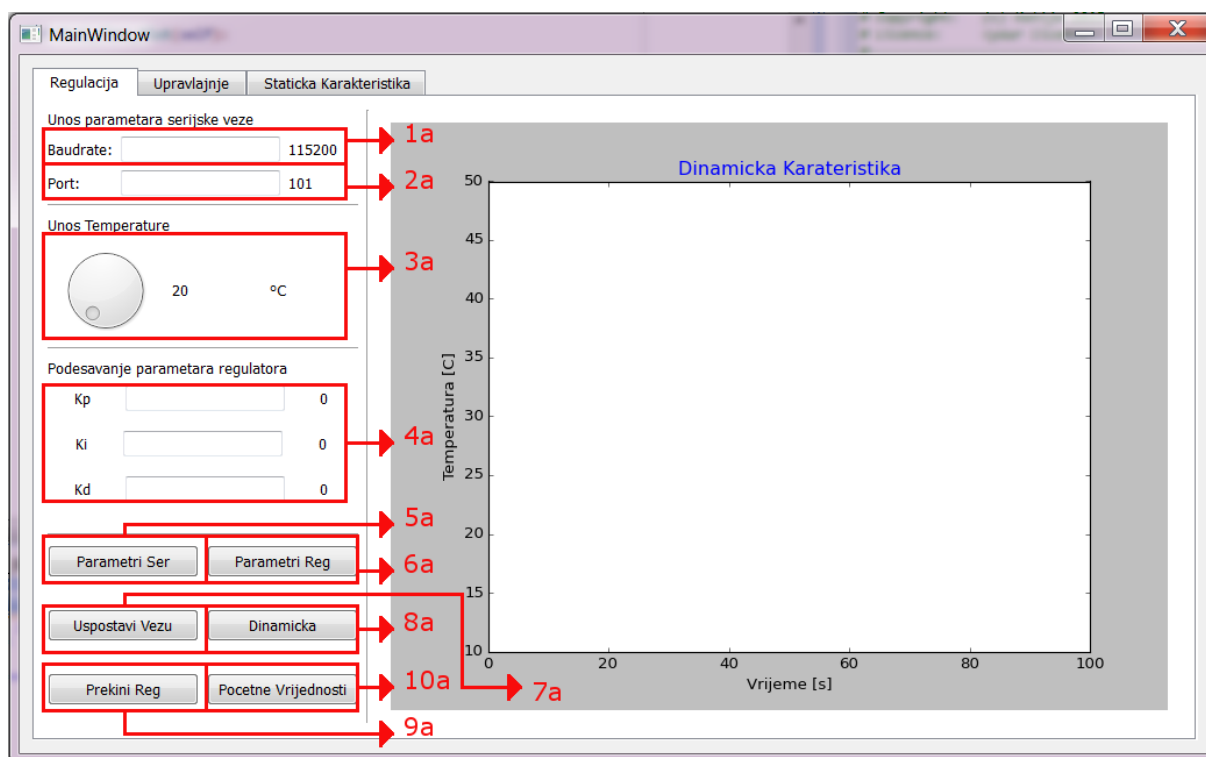
### 2.3. Program u mikrokontroleru

Mikrokontroler pokreće program napisan u C programskom jeziku. Program određuje ulogu mikrokontrolera u sustavu. U ovom slučaju služi kao posrednik za prijenos informacija te ima ulogu upravljačke jedinice koja postavlja snagu grijača.

Svi dolazni i odlazni podatci iz mikrokontrolera su u heksadecimalnom obliku. Podatci s računala predstavljaju postotak snage koja se postavlja na grijač, dok su podatci primljeni s makete izmjerene trenutne vrijednosti temperature.

## 2.4. Računalni Program (Aplikacija)

Računalni program ili aplikacija može se podijeliti na dva dijela. Prvi dio je korisničko sučelje (eng. Graphical user interface, GUI). Preko sučelja korisnik zadaje parametre za regulaciju i/ili upravljanja te ispisuje grafove odziva regulatora, dinamičke karakteristike upravljanja i graf statičke karakteristike. Drugi dio programa su pozadinske funkcije koje omogućuju izvođenje naredbi zadanih preko grafičkog sučelja. Grafičko sučelje dijeli se na tri različite kartice: regulaciju, upravljanje i statičku karakteristiku. Za svaku karticu predočit će se slika i bit će dan njen opis. Prva će biti prikazana kartica za regulaciju ([Slika 5]). Ona je najsloženija od triju kartica, s obzirom na grafički izgled i funkcionalnost koju obavlja.



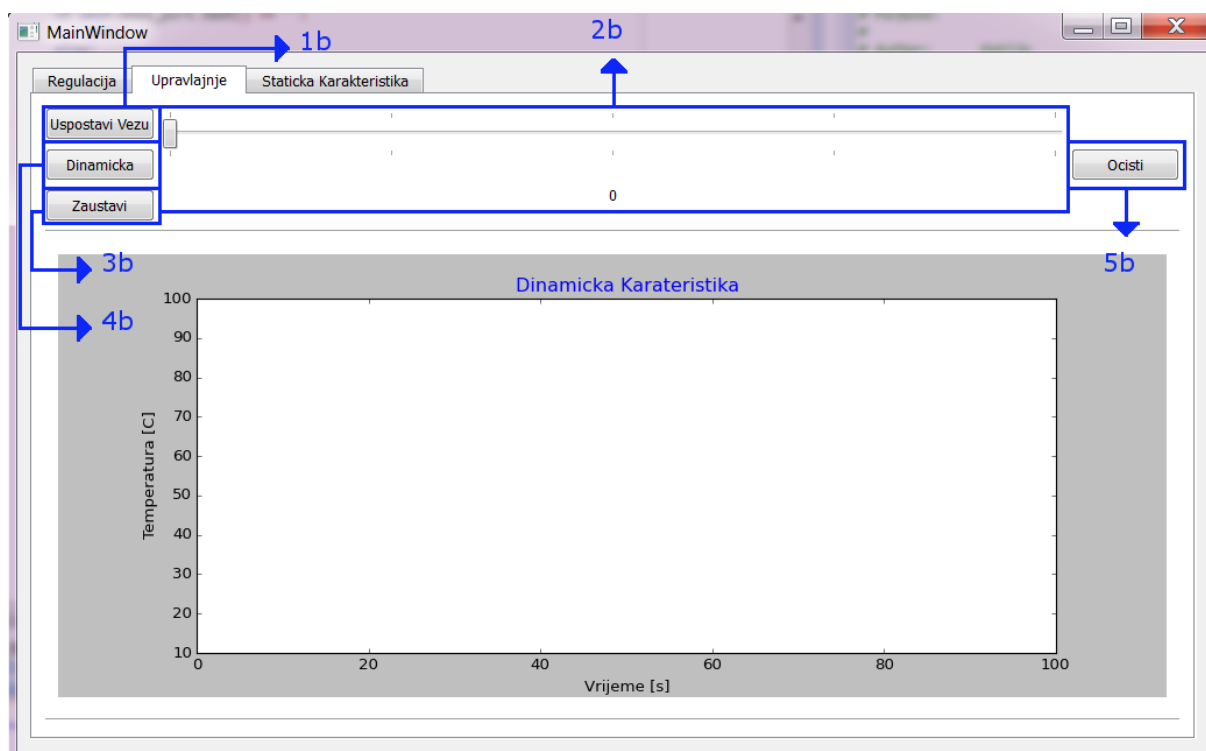
Slika 5. Kartica regulacije

Elementi označeni s 1a i 2a su parametri serijske veze. Desno od polja za unos parametara nalaze se njihove trenutno zadane vrijednosti. Promjena parametara izvodi se unosom nove vrijednosti u polje za unos. Pritiskom na tipku 5a unesene vrijednosti postaju zadane.

Elementi 3a i 4a su parametri regulatora i oni se zadaju pomoću tipke 6a. Serijska veza se uspostavlja s tipkom 7a. Tipka 8a pokreće regulaciju i ispis grafa. Dok tipka 9a prekida

regulaciju, ispis i zatvara serijsku vezu. Tipka 10a koristi se za vraćanje svih parametara parametre na njihove početne vrijednosti i resetiranje grafa. Ako se ponovi postupak zadavanja parametra bez aktivacije tipke 10a, na grafu će biti iscrtana dva odziva regulatora (to je pokazano u 5. poglavlju).

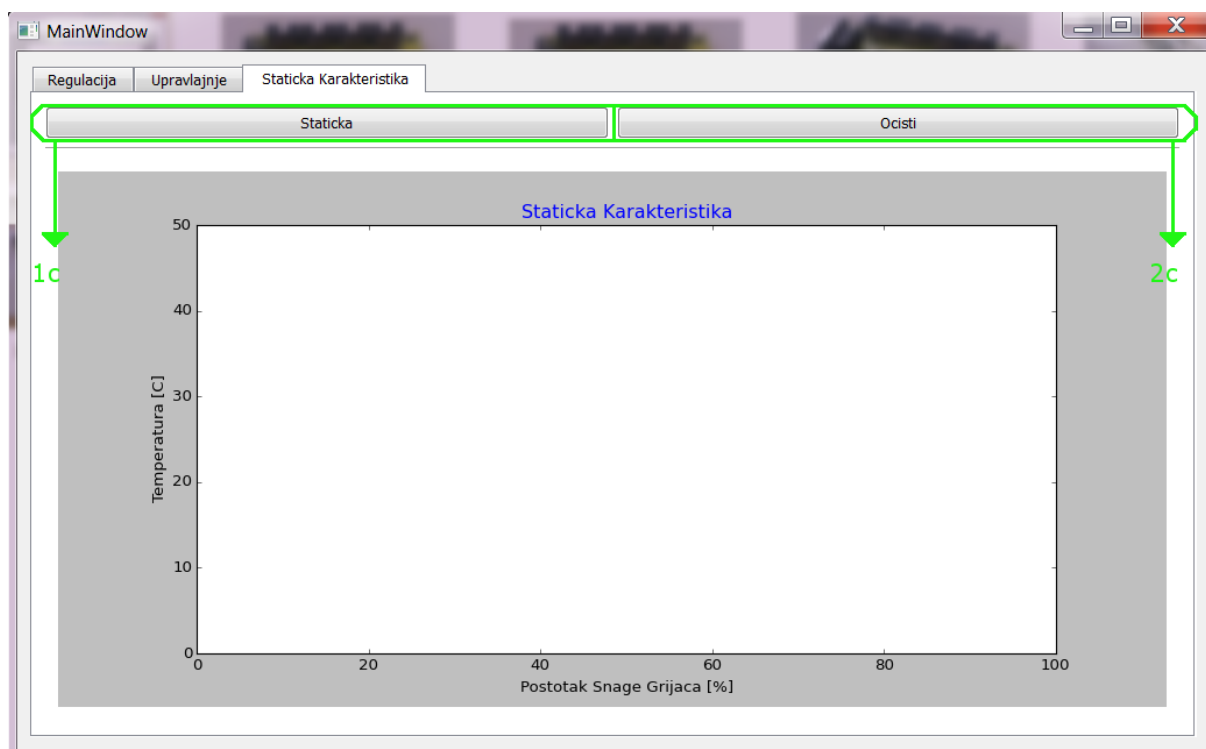
Na [Slici 6] prikazana je kartica upravljanja, koja je grafički i funkcionalno jednostavnija od regulacijske kartice. Sadrži 5 elemenata i graf, za razliku od regulacijske, koja ima 10 elemenata i graf.



Slika 6. Kartica upravljanja

Element 1b uspostavlja serijsku vezu, no potrebno je napomenuti da ako se žele promijeniti parametri serijske veze, to se može napraviti na kartici regulacije s elementima 1a, 2a i 5a. Element 2b koristi se za postavljanje ulazne veličine sustava. Element 3b pokreće upravljanje sustava i iscrtavanje njegove dinamičke karakteristike, a elementom 4b zaustavlja se upravljanje i spremaju se potrebni podatci za iscrtavanje statičke karakteristike. Zadnji element, 5b, služi kako bi se s grafa izbrisale sve snimljene dinamičke karakteristike.

Zadnja kartica je kartica statičke karakteristike ([Slika 7]) i direktno je vezana za karticu upravljanja (objašnjenje kako su statička i dinamička karakteristika sustava povezane nalazi se u 4. poglavlju). Ova kartica ima samo dva elementa i graf.



Slika 7. Kartica statičke karakteristike

Element 1c crta graf statičke karakteristike, a podatci za taj graf dobiveni su pomoću kartice upravljanja. Svaki put kada se zaustavi upravljanje elementom 4b sprema se par određenih podataka. Ovisno o tome koliko je parova podataka, kroz toliko će se točaka iscrtati graf statičke karakteristike. Element 2c resetira nacrtani graf i briše sve parove podataka pomoću kojih je nacrtan.

#### 2.4.1. Izrada aplikacije

Aplikacija je napisana u programskom jeziku Python. Ovaj jezik raširen je zbog svoje modularnosti i mogućnosti široke primjene. Modularnost Python-a karakteriziraju dvije mogućnosti. Prvo, postojanje dodatnih paketa (modula) koji omogućavaju dodatne funkcije



programa i drugo, mogućnost podjele skripte na više manjih. Veći broj manjih skripti daje bolju preglednost programa i njegovo lakše debugiranje.

Uz Python, korišten je program QtDesigner koji je dio Qt frameworka. Designer je multiplatformni alat koji se koristi za izradu grafičkog sučelja. Jednostavan je za korištenje jer se sučelje slaže na principu drag and drop, što znači da se elementi izvuku iz liste blokova i pozicioniraju na željenu poziciju unutar odabrane vrste prozora. QtDesigner i Python povezani se preko modula PyQt4, koji omogućava prebacivanje datoteka napravljenih u QtDesigneru u Python skriptu. Za izradu aplikacije korišteno je devet modula, a skripta aplikacije podijeljena je u 8 manjih skripti.

Korišteni moduli su:

pyserila – omogućava otvaranje, komunikaciju i postavu parametara serijskih portova;

matplotlib – je biblioteka za plotanje u Pythonu;

numpy – proširenje za Python koji dodaje podršku za polja i matrice te uz to dolaze i matematičke funkcije za rad s tim poljima i maticama;

PyQt4 – modul koji povezuje Python i QDesigner te omogućava pretvaranje QDesignerovih datoteka u Python skriptu.

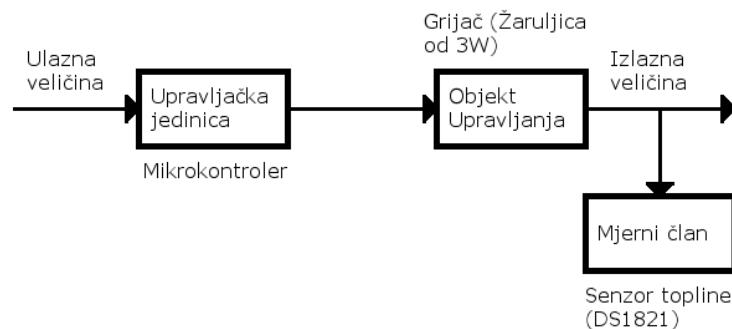
Korišteni su još: six, pyparsing, dateutil, setuptools i pytz. Svi navedeni moduli osim pyserila i PyQt4 su podrška matplotlib modulu te osiguravaju njegovu funkcionalnost.

### 3. OPIS RADA SUSTAVA

Dva su načina rada sustava. Prvi je upravljački, a drugi regulacijski. Upravljanje je jednostavniji proces, a za regulaciju se može reći da je nadogradnja na upravljanje. To se najbolje može vidjeti iz blok dijagrama upravljanja i regulacije (blok dijagrami prikazani na [Slika 7] i [Slika 8]). Ako se pogleda prvo upravljanje, a zatim regulacija vidi se da je kod regulacije dodan regulator i postavljena je povratna veza. Iako su razlike između blok dijagrama male, načini rada sustava se razlikuju.

#### 3.1. Proces upravljanja sustava

Upravljanje sustavom odvija se u otvorenom krugu. Kod ovog procesa promatra se koliko je vremena potrebno i na kojoj vrijednosti se stabilizirao izlaz sustava za zadanu ulaznu veličinu. Graf odziva sustava za zadani ulaz u stvarnom vremenu je dinamička karakteristika sustava.

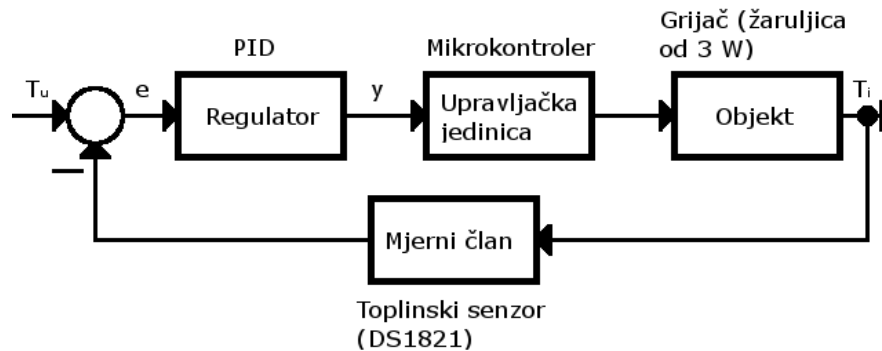


Slika 8. Blok dijagram upravljanja sustava

Za zadani zadatak u ovom radu ulazna veličina upravljanja sustavom je snaga grijača, a izlazna veličina je temperatura. Korisnik postavlja snagu grijača (ona se zadaje u postotcima) i pokreće proces. Pokretanjem procesa grijač se upali i senzor topline počinje očitavati temperaturu te ju prosljeđuje do aplikacije. Dobivena temperatura se onda iscrtava na grafu u stvarnom vremenu. Kad temperatura za zadanu snagu prestane rasti, upravljanje se zaustavlja i dobiveni graf je dinamička karakteristika sustava.

### 3.2. Proces regulacije sustava

Regulacija sustava odvija se u zatvorenom krugu. Kod regulacije gleda se odziv sustava s obzirom na ulaznu/nazivnu veličinu. Za razliku od upravljanja sustavom, ulazna veličina je željena vrijednost izlazne veličine.



Slika 9. Blok dijagram regulacije sustava

U zadanom zadatku rada regulira se temperatura. Odabran je PID regulator paralelne forme. Objekt regulacije je grijač, a mjerni član je senzor topline. Korisnik postavlja parametre serijske veze i regulatora (potrebno je napomenuti da aplikacija u sebi sadrži predodređene vrijednosti svih parametara). Nakon toga korisnik preko aplikacije uspostavlja serijsku vezu i pokreće regulaciju.

Pokretanjem regulacije događa se sljedeće: mjerni član očita temperaturu koja se onda oduzme od nazivne veličine ( $T_u$  – temperatura koju je postavio korisnik). Njihova razlika je regulacijska pogreška ( $e$ ), koja služi kao ulazna veličina u regulator te se na temelju nje izračunava postavna veličina ( $y$ ). Za ovaj sustav to je snaga grijača. Dobivena snaga se postavi na grijač, izlazna veličina se ponovo izmjeri i ciklus se ponavlja. Odziv regulacije se iscertava na grafu u stvarnom vremenu.

#### 4. KARAKTERISTIKE I IDENTIFIKACIJA SUSTAVA

Za zadani sustav u ovom radu opisane su njegove fizičke i programske komponente te je opisan način rada sustava. Međutim, opisi komponenata sustava i objašnjenje načina rada ne daju uvid u njegove karakteristike.

Razlikujemo dvije karakteristike sustava. Prva je dinamička, a druga statička. Dinamička karakteristika je odziv sustava na ulaznu upravljačku veličinu, a statička karakteristika dobiva se iz dinamičke (o tome više u poglavlju 4.2.).

Pomoću karakteristika sustava dobiva se uvid u ponašanje sustava tijekom njegovog rada. To omogućuje predviđanje ponašanja izlaza sustava s obzirom na različite ulazne veličine. Potrebno je napomenuti da karakteristike određenih sustava ovise o okolini u kojoj se sustava nalazi. To je slučaj i za sustav zadan u ovom radu, kod kojeg temperatura prostora u kojem se on nalazi ima velik utjecaj na karakteristike.

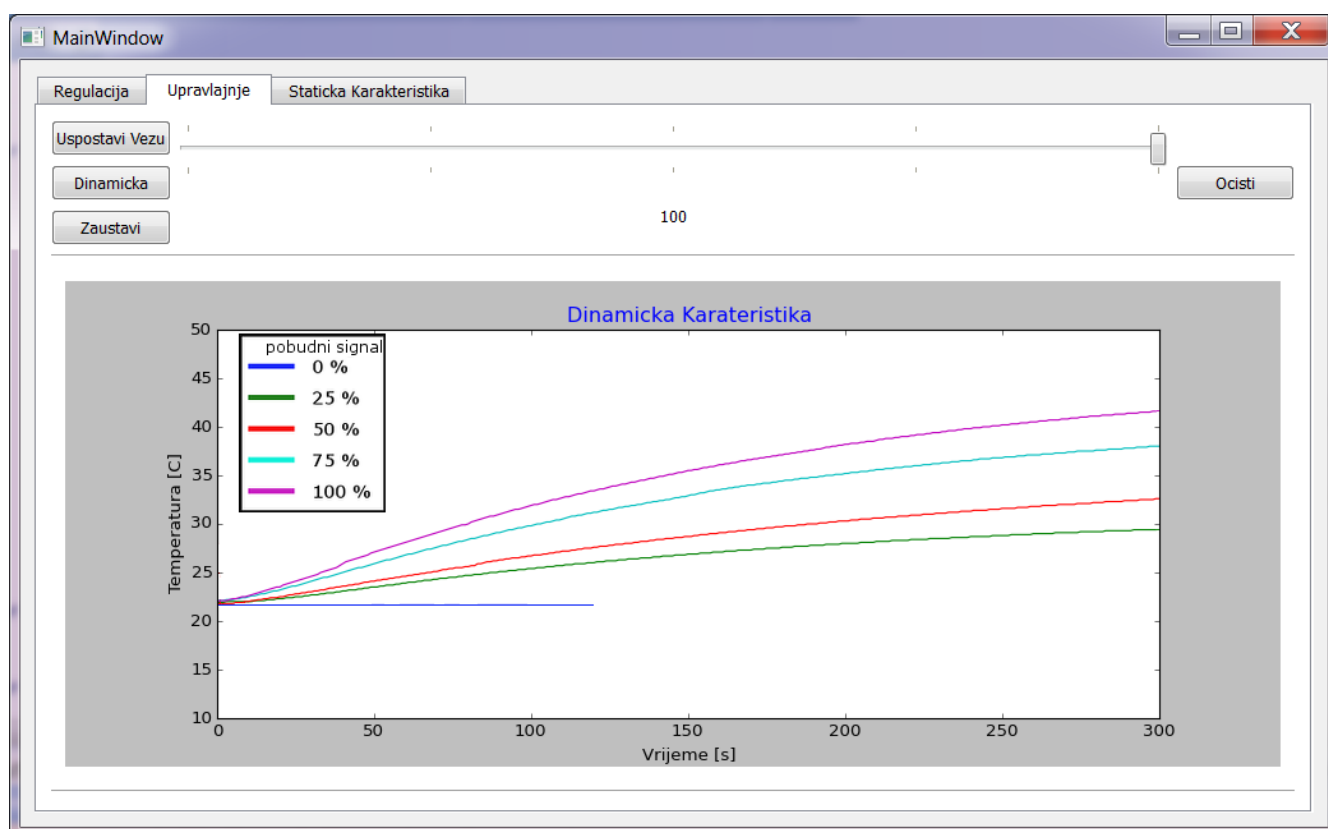
Uz karakteristike sustava važan je pojam identifikacije sustava. Svaki sustav daje se opisati pomoću prijenosne funkcije. Način određivanja prijenosne funkcije naziva se identifikacija sustava. Razlikuju se dva načina identifikacije. Prvi je analitička metoda, koja se temelji na određivanju parcijalnih diferencijalnih jednadžbi te se na temelju njih izvodi prijenosna funkcija sustava. Druga metoda je eksperimentalna i temelji se na promatranju odziva sustava za zadani ulaz. Drugim riječima, na temelju dinamičke karakteristike sustava moguće je odrediti prijenosnu funkciju sustava.

Prijenosne funkcije kod složenih sustava su velike i komplicirane, međutim može ih se rastaviti na jednostavnije elemente koji se nazivaju članovima. Članovi se svrstavaju prema djelovanju pobude na njih, tako da se razlikuju proporcionalni (P), integralni (I) i derivacijski (D) članovi. Osim toga, članovi se dijele i prema kašnjenju u sustavu, odnosno prema tome koliko je integracija potrebno kako bi se došlo do izlazne veličine. Na temelju toga razlikujemo članove prvog, drugog i trećeg reda.

Svaki član je jednostavna prijenosna funkcija, za koje postoje predefinirani grafovi odziva za različite ulazne funkcije. Zbog toga se promatranjem dinamičke karakteristike sustava može pretpostaviti koji član ili kombinacija članova najbolje opisuju sustav. Uz to, iz grafa je moguće odrediti pojačanje sustava.

#### 4.1. Dinamička karakteristika

Dinamička karakteristika sustava je promjena izlazne veličine s obzirom na postavljenu ulaznu veličinu u stvarnom vremenu. Drugim riječima, to je odziv upravljanog sustava. Za sustav u ovom radu promatrat će se promjena temperature za predodređene vrijednosti snage grijača.



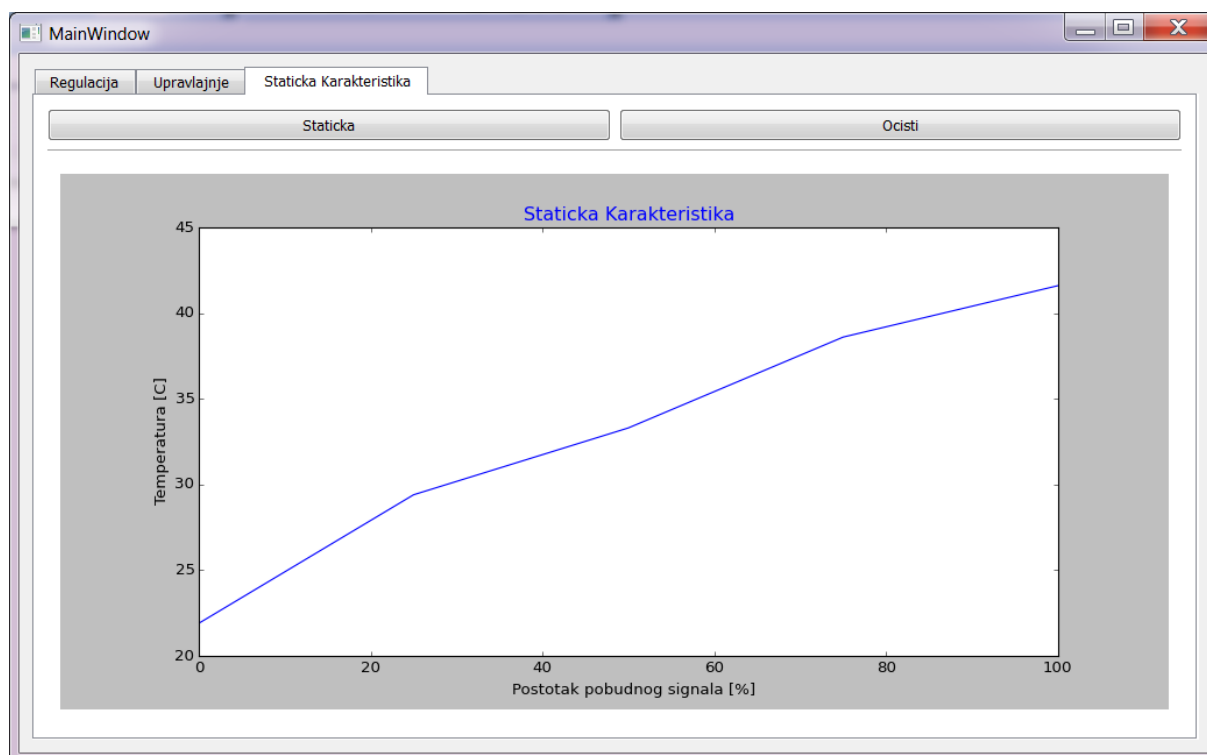
Slika 10. Dinamičke karakteristike sustava

[Slika 10] prikazuje pet dinamičkih karakteristika sustava na jednom grafu, za pet različitih snaga grijača. Svaka snaga je prikazana drukčijom bojom.

Plava linija je jedina ravna na cijelom grafu. Ona je prikaz temperature okoline prije paljenja grijača. Iz grafa je vidljivo da je za svaku snagu bio potreban različiti vremenski period unutar kojeg se temperatura stabilizirala.

## 4.2. Statička karakteristika

Statička karakteristika je, kako samo ime kaže, neovisna o vremenu te se dobiva pomoću dinamičkih karakteristika. Snimanjem dinamičkih karakteristika za različite ulazne veličine dobivaju se različite maksimalne izlazne veličine. Te dvije veličine čine jedan par podataka za svako snimljeno mjerenje. Ti parovi podataka mogu se staviti u koordinatni sustav (gdje se na x osi nalaze ulazne, a na y osi izlazne veličine) i tamo predstavljaju točke kroz koje je moguće provući graf, koji je statička karakteristika sustava. Ukratko, može se reći da statička karakteristika prikazuje odnos između ulaznih veličina i maksimalnih vrijednosti izlaza za postavljene ulaze.



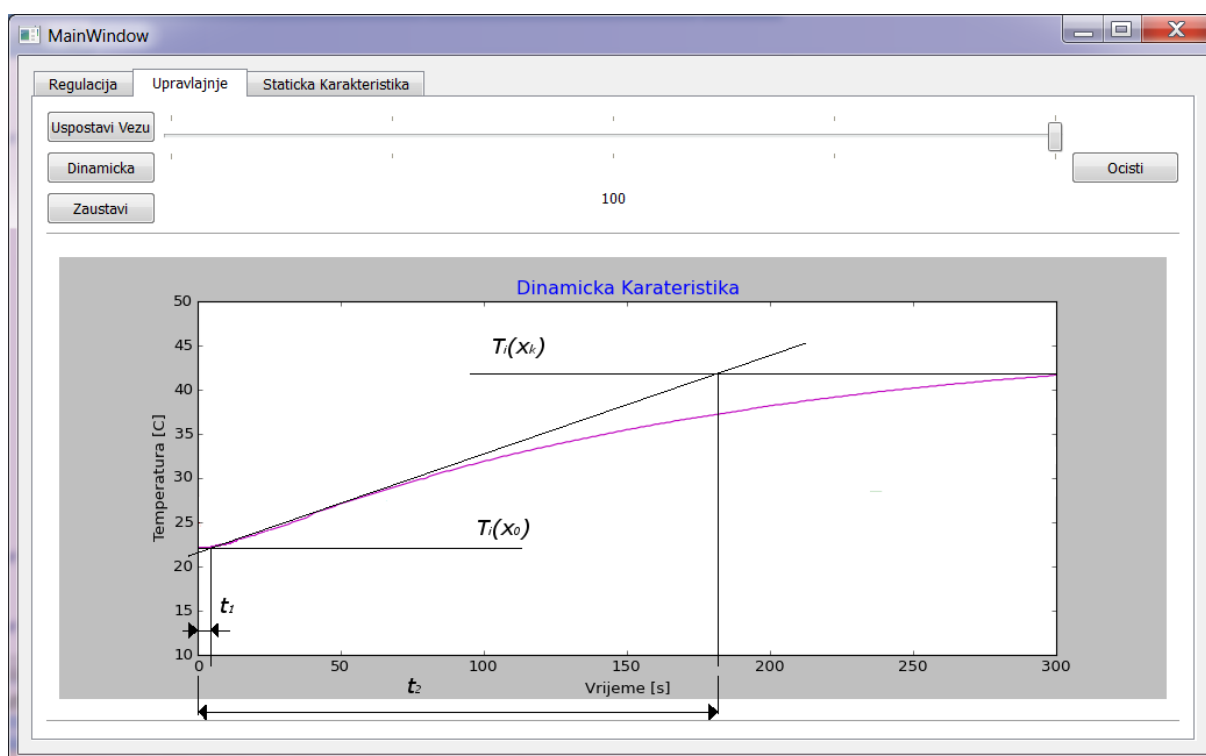
Slika 11. Statička karakteristika sustava

Za zadani sustav statička karakteristika je odnos između snage grijača i maksimalno postignute temperature za njegovu zadanu snagu. Provedeno je snimanje pet dinamičkih karakteristika sustava, tako da je graf provučen kroz pet točaka (vidljivo na [Slici 11]). Za pravu točku je samo izmjerena trenutna temperatura okoline i njoj je pridružena snaga grijača

od 0%. Statička karakteristika ovog sustava je, kao i dinamičke karakteristike, ovisna o temperaturi okoline u kojoj se sustav nalazi.

### 4.3. Identifikacija sustava

Spomenuto je da se razlikuju dva načina identifikacije sustava: analitička i eksperimentalna metoda. Kod identifikacije velikih sustava koristi se analitičko-eksperimentalna metoda, kao kombinacija koja se zasniva na postavljanju analitičkog modela, čija se točnost provjerava eksperimentalnim putem. U praksi ova metoda daje najbolje rezultate. Sustav u ovom radu je jednostavan pa će se za njegovu identifikaciju koristiti samo eksperimentalna metoda. Potrebno je naglasiti da je ulazna veličina za sustav u ovom radu opisana jediničnom odskočnom funkcijom.



Slika 12. Prijelazna karakteristika

Prvi korak kod identificiranja sustava ovom metodom je da se obzirom na izgled dinamičke karakteristike odredi o kojem je članu riječ. Prijelazna karakteristika na [Slici 12] najviše sliči

odzivu proporcionalnog člana drugog reda ( $P_2$ ) sa stupnjem prigušenja  $\zeta = 1$ . Poznato je da je za  $\zeta = 1$  odziv granično aperiodski. Iz tog razloga prijenosna funkcija  $P_2$  člana je:

$$G(s) = \frac{K_p}{(Ts+1)^2} \quad (4.3.1)$$

Nepoznate konstante u jednadžbi (4.3.1) su pojačanje ( $K_p$ ) i vremenska konstanta ( $T$ ). Kako se u ovom slučaju koristi eksperimentalna metoda identifikacije, pojačanje se može izračunati preko sljedeće formule:

$$K_p = \frac{T_i(x_k) - T_i(x_0)}{A} \quad (4.3.2)$$

Gdje su:

$K_p$  - pojačanje sustava

$T_i(x_k)$  –izlazna veličina novog stacionarnog stanja

$T_i(x_0)$  - izlazna veličina starog stacionarnog stanja

$A$  - amplituda ulazne odskočne funkcije

Vremenska konstanta ( $T$ ) u eksperimentalnoj metodi dobiva se na sljedeći način. Prvo, kroz točku infleksije provuče se tangenta na krivulju prijelazne karakteristike. Drugo, na mjestu presjeka tangente i linije novog stacionarnog stanja spušta se okomica na os apcise, ovime je dobiven vremenski interval  $t_1$ . Treće, iz sjecišta tangente i starog stacionarnog stanja također se spušta okomica na os apcise te se time dobiva vremenski interval  $t_2$ . Četvrto, razlika tih dvaju intervala je vremenska konstanta.

$$T = t_2 - t_1 \quad (4.3.3)$$

Za zadani sustav novo stacionarno stanje  $T_i(x_k) = 47,9^\circ\text{C}$ , a staro  $T_i(x_0) = 26,1^\circ\text{C}$ . Amplituda pobudne funkcije je  $A = 100\%$ . Uvrštavanjem ovih vrijednosti u jednadžbu (4.3.2) dobiva se:

$$K_p = 0,217 \frac{^\circ\text{C}}{\%} \quad (4.3.4)$$

Uvrštavanjem vrijednosti vremenskih intervala  $t_1 = 148\text{ s}$  i  $t_2 = 2\text{ s}$  u formulu (4.3.3) dobiva se vremenska konstanta:

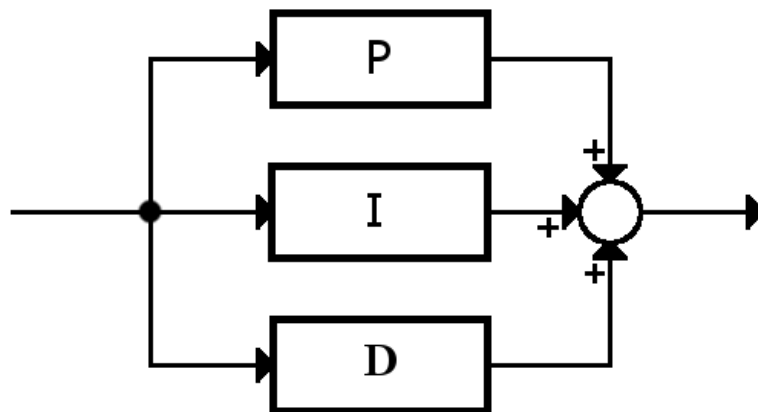
$$T = 146\text{ s}$$



## 5. REGULATORI

Danas su u svijetu automatizacije svuda prisutni proporcionalno-integralno-derivacijski (PID) regulatori i njegove reducirane inačice: proporcionalno-integralni (PI) i proporcionalno-derivacijski (PD). Osnovni elementi djelovanja PID-a sadržani su naprednim upravljačkim algoritmima, jer se pokazalo da ta kombinacija regulacijskih djelovanja daje najprihvatljiviju kvalitetu odziva.

Djelovanja PID-a mogu se formulirati na više načina. Postoji više struktura PID-a, a najjednostavnija je paralelna forma. Osim te, postoje još serijska forma, I-PD, PI-D forme. Za ovaj rad odabrana je paralelna forma PID-a (prikazano na [Slici 12]).

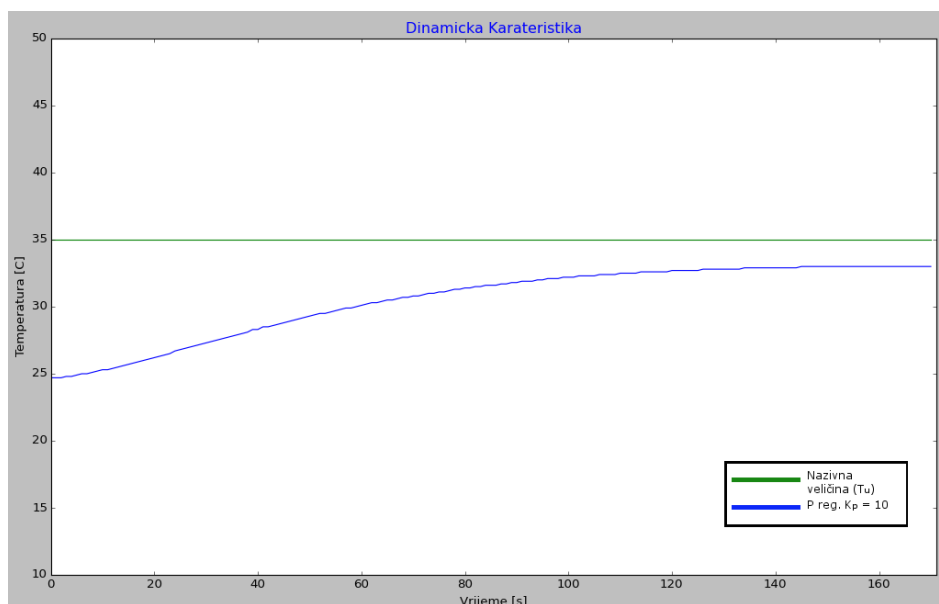


Slika 13. Blok dijagram paralelene forme PID regulatora

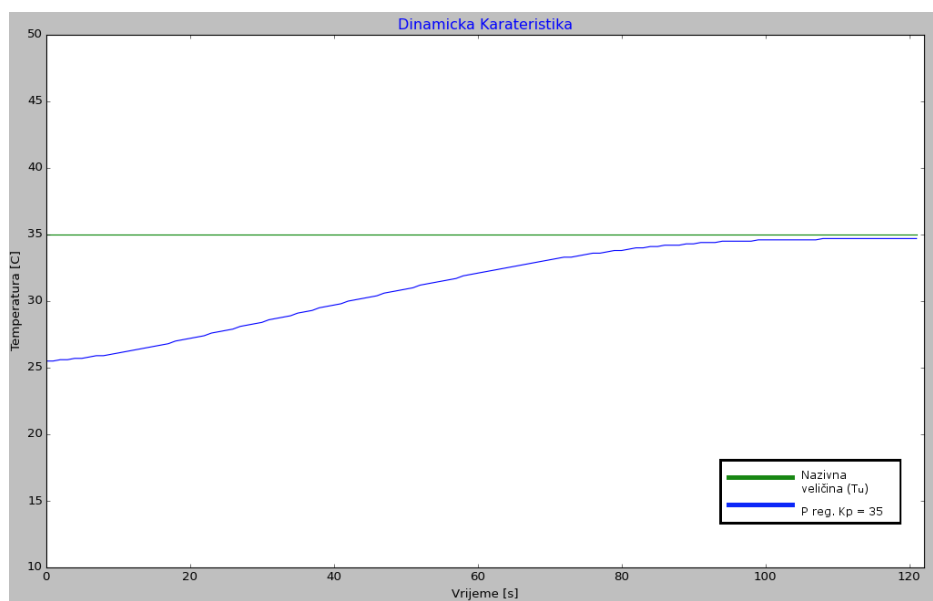
Ova forma odabrana je zato što omogućava snimanje utjecaja svakog zasebnog člana regulatora te njihove kombinacije. Kroz ovo poglavlje pokazat će se utjecaj pojedinih članova i njihovih kombinacija na proces. Za svaki član i kombinaciju članova bit će dano nekoliko snimljenih odziva sa različitim vrijednostima parametara te će biti komentirane njihove razlike.

## 5.1. P regulator

U ovom radu snimani su odzivi proporcionalnog član (P) za dani sustav sa različitim vrijednostima pojačanja  $K_p$ . Za krajnje vrijednosti uzeti su  $K_p = 10$  ([Slika 14]) i  $K_p = 35$  ([Slika 15]).



Slika 14. Odziv P regulatora



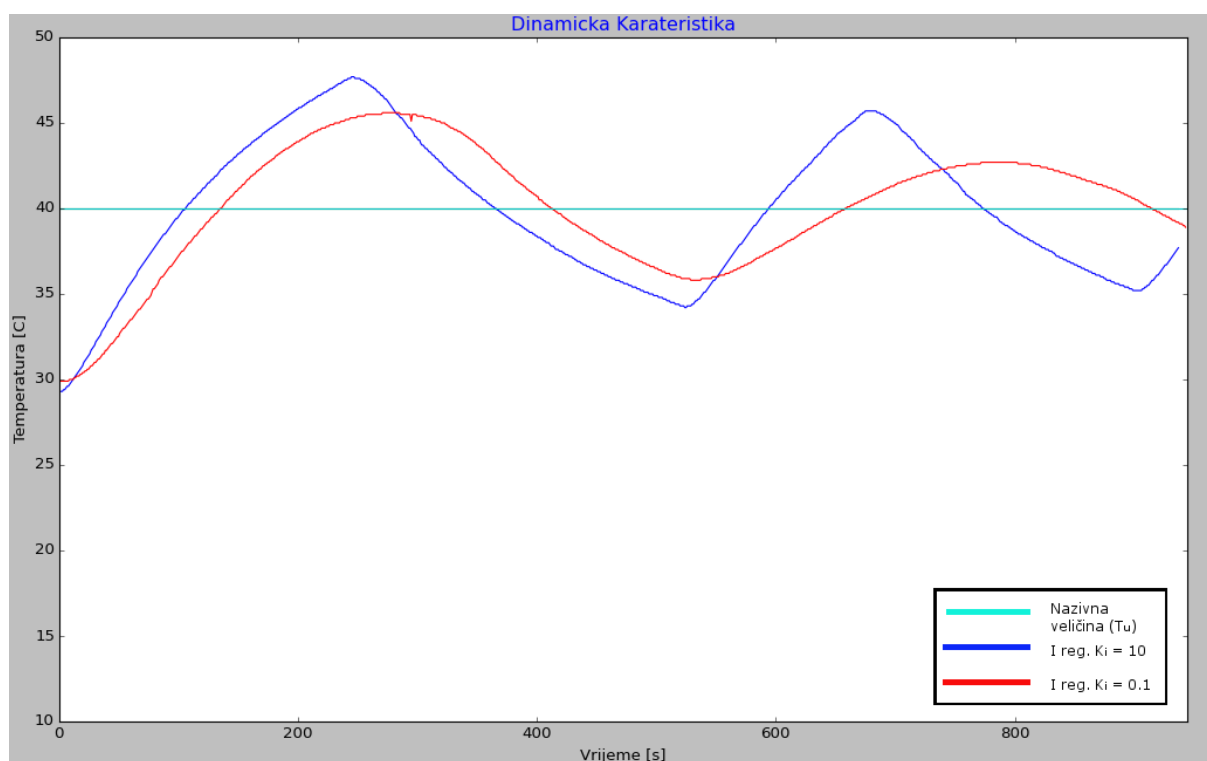
Slika 15. Odziv P regulatora

Na oba grafa odziv je aperiodski, no razlike između grafova su u brzini odziva i prebačaju nazivne vrijednosti. Prvi graf ima sporiji odziv, nema prebačaja i ima konstantnu regulacijsku pogrešku. Drugi graf pak ima brži odziv i manju konstantnu regulacijsku pogrešku.

Smanjivanjem pojačanja  $K_p$  ispod 10 dobiva se sporiji odziv i povećava se trajna regulacijska pogreška. Povećavanjem  $K_p$  iznad 35 ubrzava se odziv i dolazi do prebačaja nazivne vrijednosti te se pojavljuje negativna trajna regulacijska pogreška.

## 5.2. I regulator

Promatranjem snimljenih odziva integralnog člana vidljivo je da su istovremeno i slični i različiti.



Slika 16. Odziv dvaju I regulatora

Na [Slici 16] prikazan je graf odziva integralnih članova sa različitim pojačanjima ( $K_i$ ). Svijetloplava linija je nazivna vrijednost temperature koju korisnik želi postići. Iz grafa je vidljivo da je za  $K_i = 10$  odziv brži, a prebačaj veći. Prijelaz iz maksimalnih točki prebačaja i podbačaja su nagli. Iz toga se zaključuje da je u tim trenucima došlo do naglog gašenja ili paljenja grijača. Kad se govori o naglom paljenju misli, se na to da je grijač u jednom trenutku na 0 %, a u drugom na 100%. Za  $K_i = 0.1$  odziv je sporiji, ali prebačaji i podbačaji su manji. Krivulja odziva nema naglih prijelaza, a iz tog se može zaključiti da se grijač nije naglo palio i gasio, već mu se snaga postepeno smanjivala ili povećavala. Oba odziva su slična po tome što su oscilacijski, no potrebno je napomenuti da se oscilacije tijekom vremena smanjuju.

Povećanjem pojačanja iznad  $K_i = 10$  dobivaju se brži odzivi s većim i dugotrajnijim oscilacijama, a njegovim smanjivanjem ispod  $K_i = 0.1$  dolazi do suprotnog učinka. Integralni član nikada se ne koristi sam, no snimanjem njegovog odziva na jednostavnom procesu može se dobiti uvid u to na koji način utječe na sustav.

### 5.3. D regulator

Diferencijalno djelovanje za dani sustav nema nikakav učinka na njega. To je zato jer diferencijalni član svoj izlaz računa pomoći sljedećih formula:

$$D = e_n - e_{n-1} \quad (5.3.1)$$

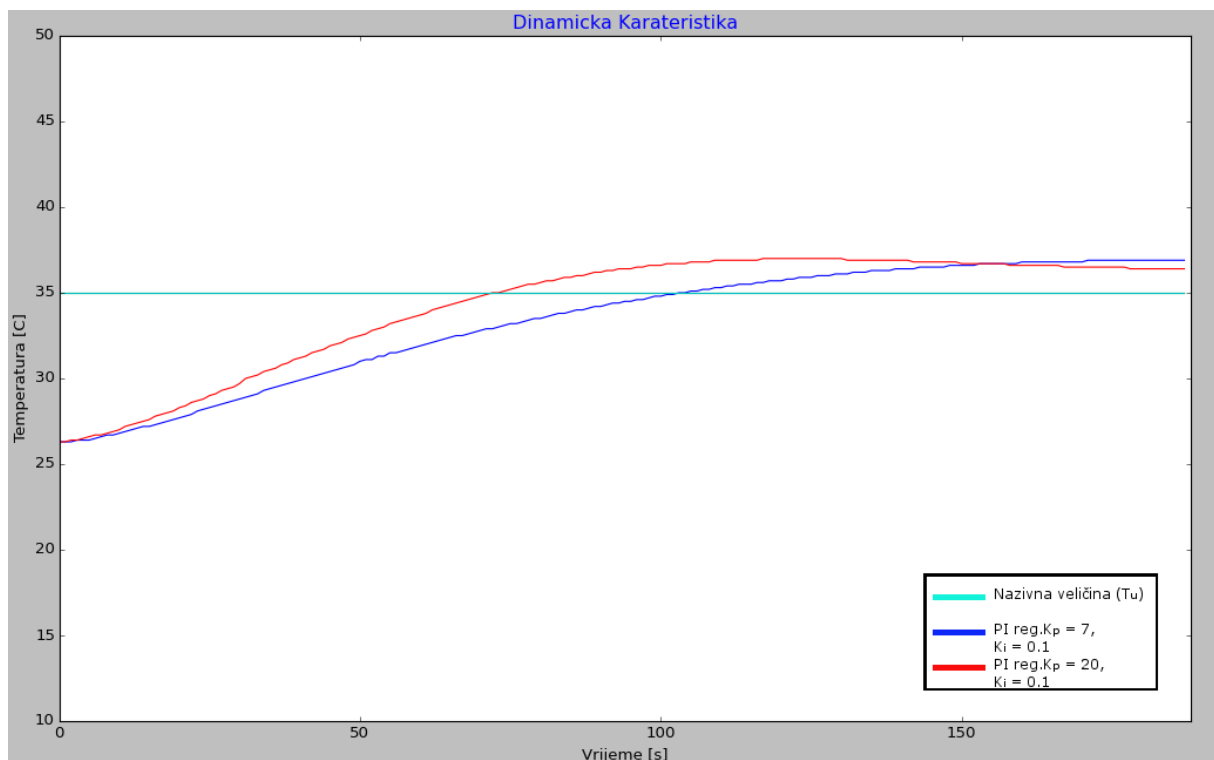
$$Y_d = K_d * D \quad (5.3.2)$$

gdje je  $D$  razlika između sadašnje i prethodne regulacijske pogreške ( $e$ ), a izlaz  $Y_d$  umnožak je te razlike i pojačanja. Derivacijski član nema učinka na ovaj sustav zato što se ovdje radi o regulaciji temperature gdje je razlika između trenutne i prethodne greške jako mala, zanemariva ili uopće ne postoji. Zbog toga se derivacijski član koristi u sustavima gdje su razlike između dviju grešaka velike.

Iz tog razloga sve inačice regulatora koje u sebi sadrže derivacijski član će se ponašati kao da on ne postoji. Ako uzmemo PD regulator za ovaj sustav, on će se ponašati kao čisti P regulator. S druge strane, kad bi se htjelo vidjeti kakav se odziv dobiva s ID regulatorom, dobila bi se ista rješenja kao da se uključio samo I član. Isto vrijedi i za PID regulator, koji za regulaciju danog sustava postaje PI regulator.

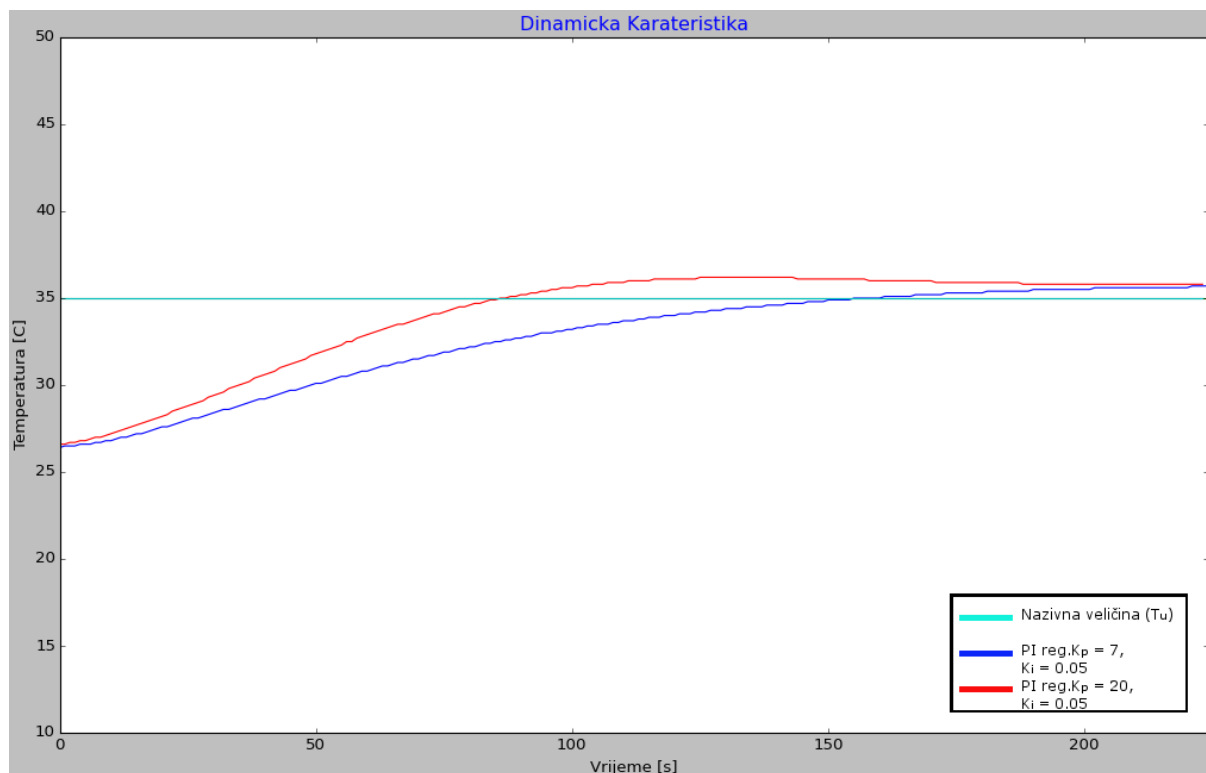
#### 5.4. PI regulator

Na svakom od četiriju grafova ([Slike 16], [17], [18] i [19]) prikazat će se po dva odziva PI regulatora. Parametri regulatora će za svaki od triju grafova biti različiti. Kako se radi o regulatoru s dva člana, samo će se jedan od dvaju parametara po grafu mijenjati kako bi se vidjelo kako ta promjena utječe na odziv regulatora.



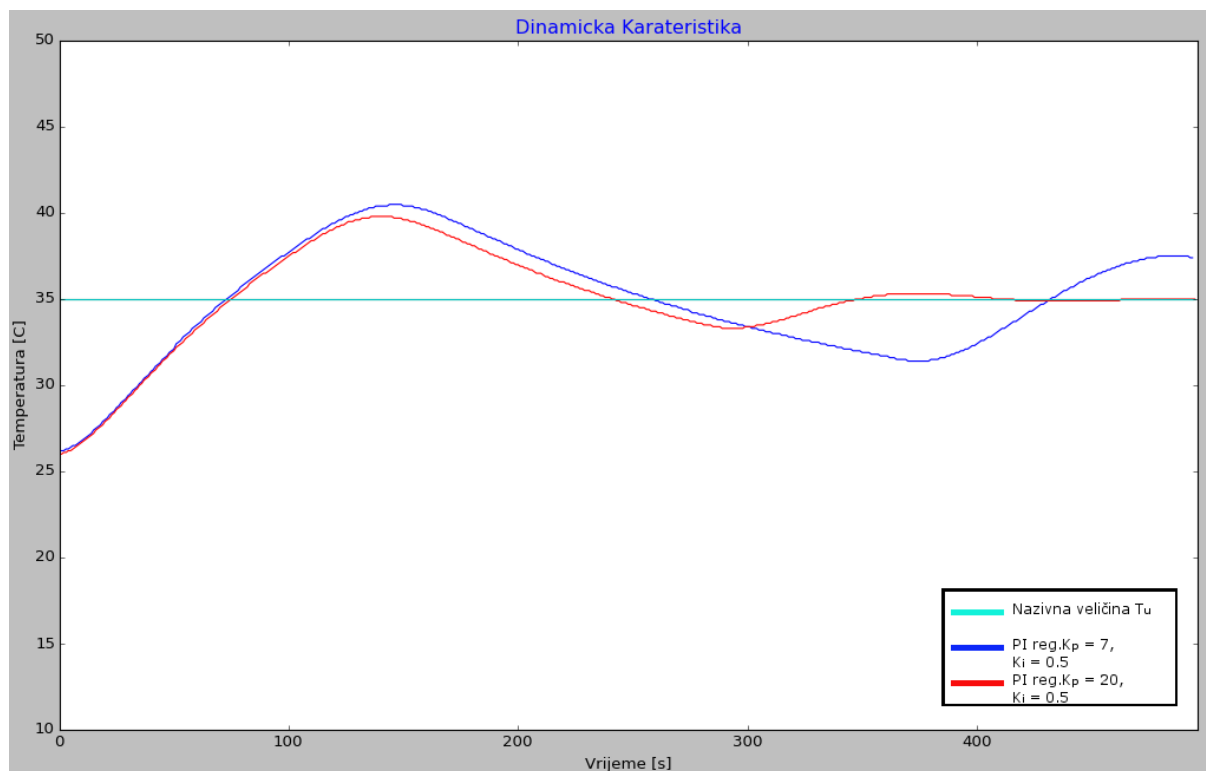
Slika 17. Odziv dvaju PI regulatora

Razlika kod zadavanja parametara je ta što crveni odziv ima oko 3 puta veće proporcionalno pojačanje ( $K_p$ ) od plavog. Oba odziva su aperiodiska i imaju prebačaj te se stabiliziraju s negativnom trajnom regulacijskom pogreškom, odnosno stabiliziraju se na temperaturi iznad nazivne. [Na Slici 16] vidljivo je da je crveni odziv brži od plavog, njegov prebačaj je veći te se stabilizira na nižoj temperaturi. U oba slučaja proces stabilizacije traje oko 200 s.



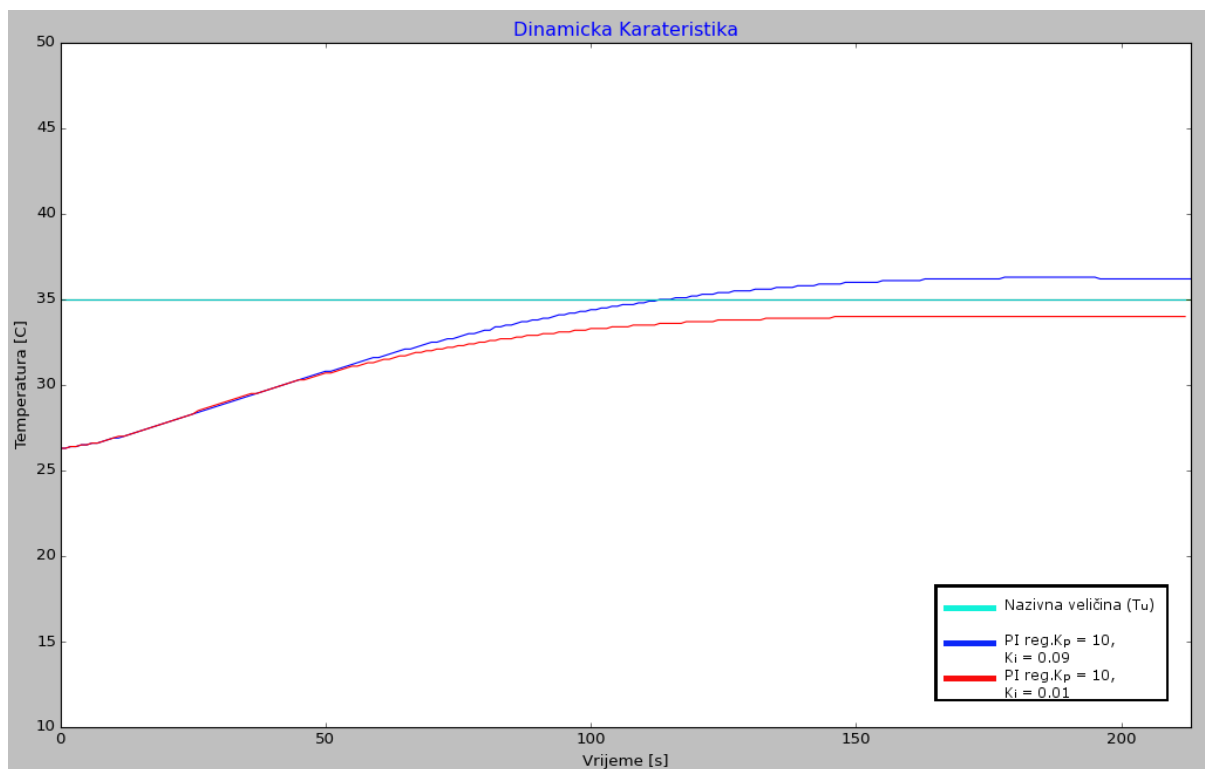
Slika 18. Odziv dvaju PI regulatora

Graf na [Slici 17] prikazuje odzive regulatora čije je proporcionalno pojačanje ostalo isto u oba slučaja, ali se zato integralno smanjilo dva puta s obzirom na prethodni primjer. Opet je riječ o aperiodskom odzivu sa prebačajem, no ovdje je odziv sporiji i prebačaj manji te se u oba slučaja proces stabilizira na istoj temperaturi. Odzivi su sporiji jer se smanjilo integralno djelovanje koje ubrzava proces.



Slika 19. Odziv dvaju PI regulatora

Na grafu sa [Slike 18] su odzivi regulatora čija su integralna pojačanja povećana deset puta s obzirom na prethodne, dok su proporcionalna i dalje nepromijenjena. Kako se iz grafa vidi oba odziva su oscilacijska, s time da prvi ima veće oscilacije. Razlog tomu su iznosi proporcionalnih pojačanja. Odziv prikazan crvenom linijom ima skoro 3 puta veće proporcionalno pojačanje. Zbog toga su oscilacije manje i brže se smire. Iz ovoga se može zaključiti da se povećavanjem integralnog djelovanja ubrzava odziv, ali se u isto vrijeme uvode nestabilnosti. Za dani sustav te se nestabilnosti mogu ukloniti adekvatnim povećanjem proporcionalnog djelovanja.



Slika 20. Odziv dvaju PI regulatora

Graf [Slike 19] daje prikaz odziva kada su proporcionalna djelovanja u oba slučaja ista a mijenjaju se integracijska. Promatranjem grafa vidi se da je plavi odziv brži od crvenog, ali mu treba duže kako bi se stabilizirao.



## 6. ZAKLJUČAK

Nakon provedenih testiranja napravljene aplikacije za regulaciju temperature na maketi te provedenih regulacija na istoj možemo izvesti nekoliko zaključaka.

Prvo, postavljanjem pojedinih osnovnih članova regulatora, kao što su proporcionalni član (P), integralni član (I) i derivacijski član (D). Vidimo da se iz snimljenih odziva P i I članova kao zasebnih regulatora može uspješno provesti regulacija, za razliku od D člana koji nije imao nikakav utjecaj na dani proces regulacije temperature. Mora se spomenuti da iako su P i I članovi uspješno proveli regulaciju procesa, jedino bi se P član sam za sebe mogao uzeti kao regulator. Ako se P može uzeti kao regulator za sebe zašto se ne bi mogao i I član? Razlog tomu jest da iako je I član uspješno proveo regulaciju, promatrajući grafove odziva iz 5.2. poglavlja primjećuju se velike oscilacije i dugi period smirivanja. To nije zadovoljavajuće jer je cilj da se regulirana veličina što brže i što bliže dosegne nazivnu vrijednosti sa minimalnim ili bez ikakvih oscilacijama (što I član nije u mogućnosti samostalno obaviti). Ovaj zahtjev donekle zadovoljavaju P regulatori, što nas dovodi do druge stavke.

Dok su P regulatori adekvatni, mogu održavati zadanu nazivnu veličinu unutar određene tolerancije. Međutim, kada se želi postići zadana temperatura u što kraćem roku, oni nisu dovoljno dobri. Razlog tomu je taj što prevelikim proporcionalnim pojačanjem da dolazi do brzog odziva, ali istovremeno i do velikog prebačaja što na kraju rezultira velikom trajnom negativnom regulacijskom pogreškom. To nas dovodi do PI regulatora, koji kombinira integralno djelovanje s proporcionalnim te se događa sljedeće: I član ubrzava odziv, dok P član daje stabilnost od oscilacija, tako da na kraju PI daje brži odziv i regulator se da finije podesiti.

Treća stavka je ta da kako D član nema utjecaja na ovaj proces jer je on kao prvo spor te se regulacijska pogreška ( $e$ ) jako malo mijenja od mjerenja do mjerenja, sve inačice regulatora sa derivacijskim članom se promatraju kao da on ne postoji. Ako za primjer uzmemo PD i PID regulatore, PD će se ponašati kao najobičniji P regulator, a PID kao PI regulator. Tako je PI najsloženiji regulator (dobiven iz paralelne strukture) koji može utjecati na dani sustav. Za kraj, važno je spomenuti da iako je u ovom radu uzeta paralelna struktura regulatora, to ne mora biti slučaj za druge sustave.

## LITERATURA

- [1] Petrić, J.: Automatska regulacija: uvod u analizu i sintezu, FSB sveučilište u Zagrebu, 2012.
- [2] Kuljača, Lj. i Vukić, Z.: Automatsko upravljanje analiza linearnih sustava, Kigen Zagreb, 2005.
- [3] Majetić, D.: Skripte za predavanja iz kolegija: 'Upravljanje i regulacija', FSB Zagreb, 2012
- [4] Python: <https://www.python.org/>
- [5] matplotlib: <http://matplotlib.org/>
- [6] matplotlib API: <http://matplotlib.org/1.4.3/api/index.html>
- [7] pyserila: <http://pyserial.sourceforge.net/>
- [8] pyserila API: [http://pyserial.sourceforge.net/pyserial\\_api.html](http://pyserial.sourceforge.net/pyserial_api.html)
- [9] QtDesigner : <http://doc.qt.io/qt-4.8/designer-manual.html>
- [10] matplotlib za Python developere poglavlje 6:  
[http://q3k.org/gentoomen/Programming/Python/Matplotlib%20for%20Python%20Developers%20\(2009\).pdf](http://q3k.org/gentoomen/Programming/Python/Matplotlib%20for%20Python%20Developers%20(2009).pdf)

## **PRILOZI**

### **I. CD-R koji sadrži:**

- Program korišten za upravljanje i regulaciju (RiU\_Temperature.exe)
- Python skrpice iz kojih je napravljena .exe datoteka
- Module potrebne za pokretanje skripti pomoću Pythona
- Emulator za virtualne serijske portove
- Terminal program preko kojega program šalje i prima podatke
- Sve slike sadržane u radu